专题：海洋观测探测与安全保障技术
Ocean Observation and Security Assurance Technology

引用格式：李硕, 吴园涛, 李琛, 等. 水下机器人应用及展望. 中国科学院院刊, 2022, 37(7): 910-920.
Li S, Wu Y T, Li C, et al. Application and prospect of unmanned underwater vehicle. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(7): 910-920. (in Chinese)

水下机器人应用及展望

李 硕[1,2] 吴园涛[3] 李 琛[3] 赵宏宇[1*] 李一平[1,2]

1 中国科学院沈阳自动化研究所 机器人学国家重点实验室 沈阳 110016
2 中国科学院大学 北京 100049
3 中国科学院 重大科技任务局 北京 100864

摘要 水下机器人是人类探索海洋、认识海洋的先进技术手段之一，是我国建设海洋强国的重要装备支撑。文章介绍了国内外水下机器人的发展现状，重点阐述以中国科学院沈阳自动化研究所为代表研制的我国谱系化水下机器人在深海资源勘查和科学研究、深渊科考、南极和北极调查中的最新应用成果。结合当前水下机器人研究基础，展望未来水下机器人的发展和应用方向。通过研发适应极端海洋环境的深远海科考装备，实现从航次型科考模式向深海长期驻留型科考模式的技术跨越，实现从有人科考向无人化科考模式的革命性转变。

关键词 水下机器人，深海资源调查，深海科学研究，深渊科考，极地应用

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20220506001

党的十八大报告明确提出，提高海洋资源开发能力，发展海洋经济，保护海洋生态环境，坚决维护国家海洋权益，建设海洋强国。党的十九大报告要求加快建设海洋强国。探索和认识海洋需要包括水下机器人在内的多种海洋技术装备，“十二五”“十三五”期间，国家重点部署了4 500 m级和11 000 m级深海技术装备的研制；“十四五”规划进一步提出，要在深海、极地等前沿领域实施一批具有前瞻性、战略性的国家重大科技项目。深海探测、海洋资源开发利用等已成为新兴战略性领域[1]，关注深海、聚焦深海资源的开发已上升为国家战略。

近年来，水下机器人（UUV）在海洋科学研究、海洋工程及战略高技术等领域得到了广泛应用。通常，水下机器人可分为自主水下机器人（AUV）和有缆遥控水下机器人（ROV）。AUV自带能源自主航行，可执行大范围探测任务，但作业时间、数据实时性、作业能力有限。ROV依靠脐带电缆提供动力，水下作业时间长、数据实时，作业能力较强，但作业范

*通信作者
资助项目：中国科学院海洋大科学研究中心重点部署项目（COMS2019Z02）
修改稿收到日期：2022年5月30日

围有限；近年来发展的混合式水下机器人—自主/遥控水下机器人（ARV）结合了AUV和ROV的优点，自带能源，通过光纤微缆实现数据实时传输，既可实现较大范围探测，又可实现水下定点精细观测及轻作业。ARV是信息型AUV向作业型AUV发展过程中的出现新型水下机器人[2]。此外，水下滑翔机（glider）作为一种新技术平台[3]，适用于长时间、大范围海洋环境观测，近年来逐渐成熟。

水下机器人能够在极端海洋环境下工作，到达人类难以到达的海区，在探索人类未知世界发挥越来越重要的作用。通过自主航行控制、导航定位通信、能源动力推进、目标探测识别、机械手作业等高新技术的不断突破，水下机器人将有效推动在海洋环境观测、深海资源探测和开发、深渊和极地的科学考察等领域的应用。

1 国外水下机器人发展现状

国外水下机器人研究已有近70年的历史。以美国为代表的西方发达国家，先后研发了ROV、AUV、ARV，以及水下滑翔机等多种不同类型的水下机器人，成功用于深海资源调查、海洋科学考察、水下搜索救捞等领域。

目前全球有上百家ROV制造商，正在使用的ROV数以千计，而且还在继续增长。其中美国、加拿大、英国、法国和日本等发达国家在ROV领域处于领先地位，占据了绝大部分的商用市场份额。美、日、俄、法等国家已经拥有了从水面支持母船到潜深3 000—11 000 m的系列深海装备，通过装备之间的相互支持、联合作业和安全救助等，能够顺利完成水下调查、搜索、采样、维修、施工和救捞等任务[4]。

自20世纪50年代美国华盛顿大学研制出世界上首台AUV以来，其发展已经历了60余年。20世纪90年代后期，随着计算机技术发展和电子技术的日益成熟，AUV进入快速发展阶段，一批有影响的AUV相继研制成功并成功应用，包括美国的ABE、英国的Autosub、加拿大的Theseus。进入21世纪，AUV技术得到了进一步的发展，产品化的AUV不断涌现，如美国Hydroid公司的Bluefin系列、挪威Kongsberg公司的REMUS系列和HUGIN系列、美国Teledyne公司的Gavia系列，标志着AUV进入了实际应用阶段[2]。

美国、日本等海洋强国先后研战功研制于不同工作目标的ARV，其研究成果得到国际广泛认可。最具代表性的是美国伍兹霍尔海洋研究所研制的HROV Nereus（“海神”号），具有AUV、ROV两种作业模式，但需要在机器人下水前现场进行作业工作的换装[5]。自2011年起，在“海神”号基础上，针对极地海冰调查，伍兹霍尔海洋研究所开始研制新的混合型水下机器人Nereid UI，其最大工作水深2 000 m，携带20 km的光纤微缆，并搭载多种生物、化学传感器，可进行大范围的冰下观测和取样等作业。

国外水下滑翔机技术的发展与应用主要集中于美国、法国、英国和澳大利亚等国。20世纪90年代，美国相继开发成功Slocum、Seaglider和Spray 3种水下滑翔机，并持续进行技术攻关和应用。此外，欧洲和澳大利亚从21世纪开始专注于水下滑翔机的应用和协作技术的研究，并组建了各自的水下滑翔机观测网络[6]。

总结国外水下机器人目前发展的现状，ROV已产业化并被广泛使用，其发展更强调作业能力，以及提高其作业的自主性；由于水下能源、通信和导航技术的约束，AUV依然是当前研究的热点并且正在经历产品化的过程，系列化的产品不断涌现；ARV技术在极地和深渊科考中的应用，有效拓展了AUV的应用领域；水下滑翔机作为低成本大范围海洋观测设备，通过获取海量数据，改变了人类对海洋的认识。水下机器人技术的发展，离不开需求牵引的广泛应用，正是不断地应用，推动了水下机器人的技术进步。本文重

点介绍我国水下机器人应用现状。

2 我国水下机器人应用现状

我国的水下机器人研究工作始于 20 世纪 70 年代末期。40 多年来，我国水下机器人技术得到了快速发展。进入 21 世纪，在科学技术部、中国科学院、中国大洋矿产资源研究开发协会（以下简称“中国大洋协会”）等部门和组织的支持下，以“潜龙/探索”系列自主水下机器人、“海星/海龙/海马”遥控水下机器人、“海斗”系列自主遥控水下机器人、“海翼/海燕”系列水下滑翔机等为代表的深海技术装备成功研制与应用，带动了深海技术的进展，极大地提高了我国深海科学研究与深海资源勘探水平。中国科学院沈阳自动化研究所（以下简称“沈阳自动化研究所”）是我国最早开展水下机器人研究的单位，其研制的海洋技术装备在一定程度上反映了中国水下机器人的研究进展。下面，以沈阳自动化研究所为例，介绍我国水下机器人应用现状。

2.1 积极推动我国水下机器人在深海领域的持续应用

2.1.1 初步构建我国深海资源自主勘查的技术装备体系

深海蕴藏着地球上远未认知和开发的宝藏，是人类社会谋求未来生存与发展的重要战略新疆域。随着人类社会的高速发展，对各种资源的需求不断攀升，陆地资源面临日益紧张的局面，开发和利用深海矿产资源是人类可持续发展的重要保障。深海矿产资源被认为是 21 世纪最重要的陆地矿产接替资源，作为人类尚未开发的宝地和高技术领域之一，已经成为各国的重要战略目标。自 2001 年起，我国已经获得了包括多金属结核、多金属硫化物、富钴结壳等 3 种资源类型在内的 5 个大洋海底勘探合同区，成为资源种类最全、勘探合同区最多的国家之一，有效地拓展了国家战略资源的新来源。这些矿区的前期开发申请及勘探合同签订后，都需要高精度、高效的探测装备[7]。

“十三五”期间，为满足现有国际海底矿区勘查和新矿区圈定的迫切需要，在国家重点研发计划、中国大洋协会、国际海域资源调查与开发等项目的支持下，沈阳自动化研究所联合国内多家机构，攻克复杂海底环境下的高精度导航、自主避障和稳定航行控制等多项关键技术，成功研制了具有微地形地貌测量、海底照相、水体异常探测、磁力探测等功能的深海资源自主勘查系统——“潜龙”系列深海 AUV（图 1）。结合探测任务及海底环境，“潜龙一号”和“潜龙四号”设计为圆柱回转体，适用于海底相对平坦矿区；“潜龙二号”和“潜龙三号”设计为立扁鱼型非回转体，适用于复杂海底地形矿区。“潜龙”系列深海 AUV 用于多金属结核、富钴结壳、多金属硫化物、天然气水合物等多种深海资源的精细勘查，填补了我国深海资源自主勘查的空白。“潜龙”系列深海 AUV 先后参加了 10 余次大洋科考航次，在太平

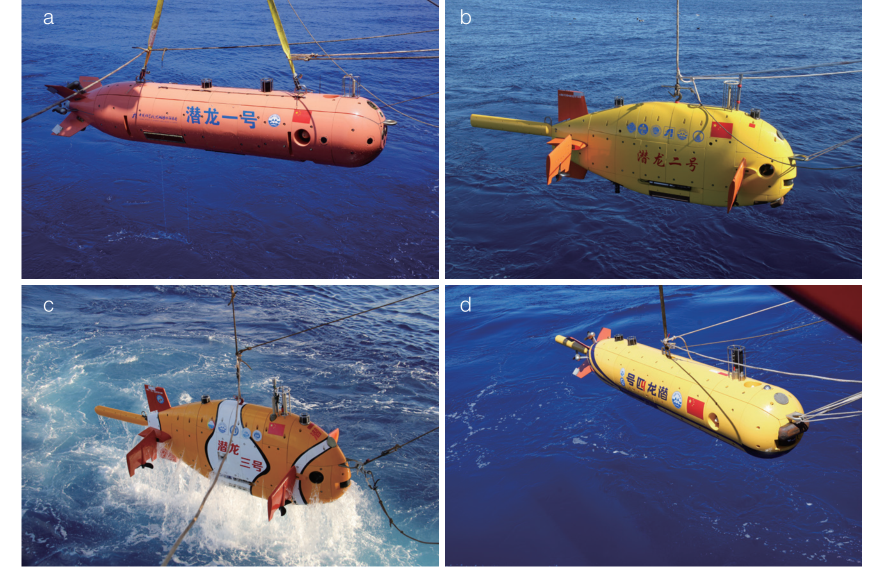


图 1 “潜龙”系列自主水下机器人
Figure 1 “Qianlong” series autonomous underwater vehicles
（a）潜龙一号；（b）潜龙二号；（c）潜龙三号；（d）潜龙四号
(a) Qianlong 1; (b) Qianlong 2; (c) Qianlong 3; (d) Qianlong 4

洋、大西洋、印度洋等海域开展航次应用，累计下潜近百次，完成声学探测测线超过5 000 km，声学探测面积近2 000 km^2。根据“潜龙”系列深海AUV获取的海底多元数据，科学家对深海矿产资源的分布和成矿机理有了重要发现，为矿区区域放弃和后续资源开发提供了精准数据和模型。

2.1.2 初步构建我国海洋科学研究的自主观测与作业技术体系

海洋科学是海洋技术发展的源泉，海洋技术是海洋科学创新的动力。历史上，海洋学的创新都源自海洋调查观测的结果，海洋科学的创新研究与海洋观测和探测技术密不可分。在国家“863”计划、国家重点研发计划、中国科学院战略性先导科技专项的支持下，沈阳自动化研究所成功研制出“探索”系列自主水下机器人、“海星6000”遥控水下机器人、“海翼”系列水下滑翔机等装备并取得重大突破，初步构建了面向海洋科学研究的自主观测与作业技术体系，成功在西太平洋、印度洋、南海、东海、黄海等海域开展应用，实现多水下机器人集群组网探测，开启了我国海洋科考新模式。

面向海洋科学研究需求，在国家重点研发计划的支持下，沈阳自动化研究所研制的“探索100”是一套集声学探测和光学观测的50 kg级模块化便携式AUV，实现了小批量制造，在突破无人潜水器协同控制组网观测等关键技术的基础上，实现了基于声通信的多AUV组网观测应用。2019—2020年，由多台“探索100”（图2）组成的水下机器人组网观测系统开展了多项海洋特征观测海上试验及示范应用。利用多台AUV对大亚湾冷水团入侵和岬角涡旋现象进行观测，首次获得了大亚湾海域高分辨率的冷水团入侵和岬角涡旋精细结构特征，为研究上升流冷水对大亚湾底层生态系统的影响提供依据。在重点海区利用多AUV开展了协同热点区域搜索、编队和温跃层协同观测试验，以及海洋环境场自适应观测应用示范，按实时规划的航迹，对环境场变化最快的海域进行观测，有效修正了该海域海洋系统模式，提高了海洋环境场预测精度。

“探索4500”是一套集成微地形地貌测量、海底照相、热液异常探测等传感器的4 500 m级AUV，可在深海热液活动区和冷泉区开展精细声学探测、近底光学观测。自2017年起，“探索4500”多次参加海上应用，包括冷泉区近底自主高精度探测，与“海马”号ROV在南海北部陆坡海域开展联合调查等任务。“探索4500”在水体观测和光学调查任务中，获得大量水体观测数据和高清海底照片，拍摄到具有“冷泉”特征的海底生物（图3），为发现新的海底大型

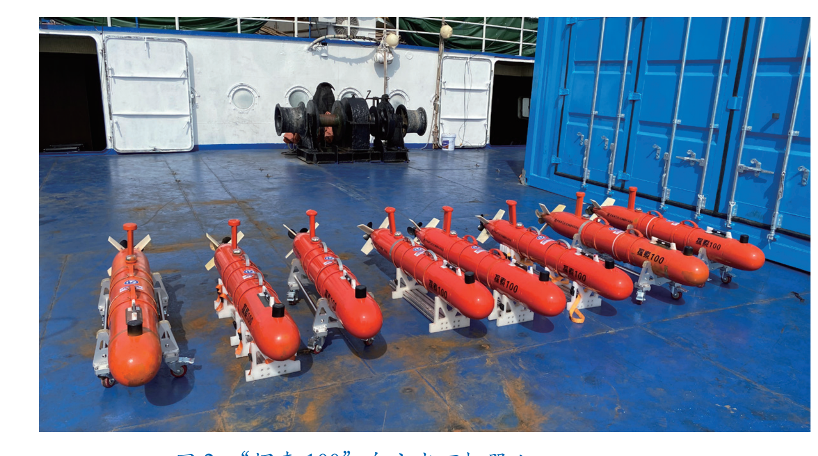


图2 “探索100”自主水下机器人
Figure 2 “Tansuo 100” autonomous underwater vehicles

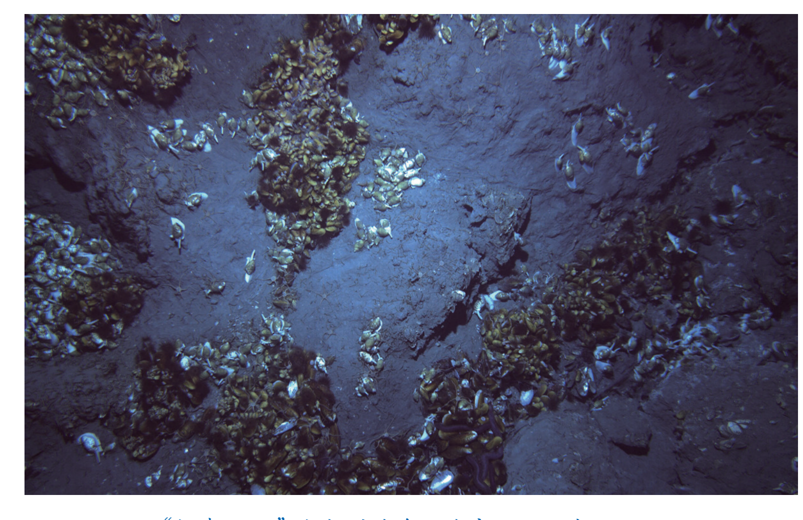


图3 “探索4500”拍摄的冷泉区海底贻贝照片
Figure 3 Photos of sea mussels in cold spring area taken by “Tansuo 4500”

活动性“冷泉”，查明其分布范围、生物群落及流体活动等奠定坚实基础。

“海星 6000”是我国首台自主研发面向科考应用的 6 000 m 级 ROV 装备，最大作业功率 50 HP①，最大工作深度 6 000 m，采用全电动推进，搭载有七功能机械手、回转生物吸取样器、宏生物采集箱、沉积物取样器、采水瓶等深海科考工具，具备浮力调节和水下广播级高清视频拍摄，可进行近海底采样作业。在 2018 年科考航次中，“海星 6000”（图 4）连续工作数小时，完成了 6 000 m 近海底航行观察、生物调查、海底表层沉积聚成物获取、泥样和水样采集、模拟黑匣子搜索打捞、标识物放置等，最大工作深度 6 001 m，创造我国 ROV 最大潜深的纪录。

水下滑翔机是一种依靠浮力调整洋流驱动的新型水下机器人，无螺旋桨推进器，具有长续航力优势。2009 年，“海翼 1000”在国内率先突破海上航行距离 1 000 km 的基础上，2021 年，“海翼 1000”滑翔机海上航行距离已经超过 5 000 km，最长持续工作 302 天，观测剖面数超过 1 500 条，再次创造我国水下机器人续航力新纪录。

在单体性能提升的基础上，“海翼”水下滑翔机连续开展海洋科考航次集群应用。2017 年 7 月，首次开展多水下滑翔机协同观测任务，创造了当时我国海上连续工作时间最长、航行距离最远、观测剖面数最多的纪录，为开展深海海洋环境精细探测提供了系统解决方案。2019 年，11 台“海翼”水下滑翔机完成西北太平洋中尺度涡旋（冷涡）综合观测。2020 年，12 台“海翼”水下滑翔机（图 5）完成印度洋联合海



图 4　“海星 6000”遥控水下机器人

Figure 4　“Haixing 6000” remotely operated vehicle

① 1 HP 约为 745.7 W

洋与环境研究计划（JAMES 研究计划）冬季调查任务。2021 年，8 台“海翼”水下滑翔机作为重要调查装备参加了由中国科学院海洋研究所组织的国家自然科学基金共享航次计划西太平洋科学考察实验研究任务，成功完成西太平洋集群观测应用。“海翼”水下滑翔机的规模化应用，标志着我国水下滑翔机达到实用化水平。

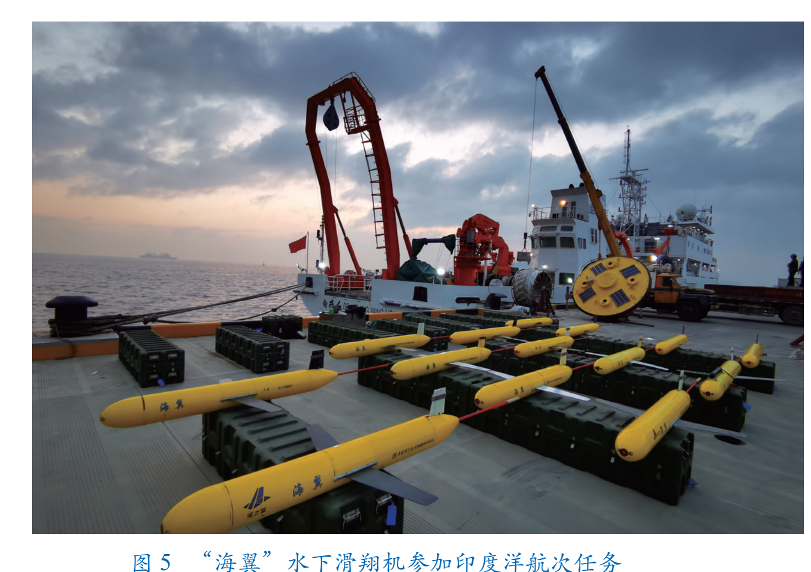


图 5　“海翼”水下滑翔机参加印度洋航次任务



Figure 5　“Haiyi” Glider participated in the Indian ocean voyage

2.2 全面引领我国水下机器人在深渊领域的创新应用

近年来，深渊科学正成为国际地球科学尤其是海洋科学的最新前沿领域。随着深渊探测技术瓶颈被逐步突破，深渊科学研究成为我国占领国际海洋科学研究制高点的重要机会，对我国海洋科学事业的发展乃至国家整体科学创新实力的提高均发挥了重要的推动作用。

在中国科学院战略性先导科技专项支持下，沈阳自动化研究所自主研制的全海深无人潜水器关键技术验证平台——“海斗”号（图 6），是我国首台下潜深度超过万米的水下机器人，搭载有温盐深仪和高清水下摄像机等传感器和设备，最大工作水深 11 000 m，可通过微细光缆进行通信和视频传输。2016—2018 年，“海斗”号连续 3 年参加我国马里亚纳海沟深渊科考航次。“海斗”号总计下潜 40 次，其中 11 次到达万米以下深度，最大下潜深度 10 905 m，创造我国水下机器人最大下潜及作业深度记录，获得我国首批全海深温盐深数据资料，实现我国首次全海深高清视频直播。



图 6　“海斗”号自主遥控水下机器人

Figure 6　“Haidou” autonomous & remotely operated vehicle

2020 年 5 月，在国家重点研发计划支持下，沈阳自动化研究所牵头研制的“海斗一号”自主遥控水下机器人（图 7）在马里亚纳海沟成功完成首次万米海试与试验性应用，最大下潜深度 10 907 m，为我国开展深渊科考获取了首批重要数据和样品，填补了我国万米级作业型无人潜水器的空白。

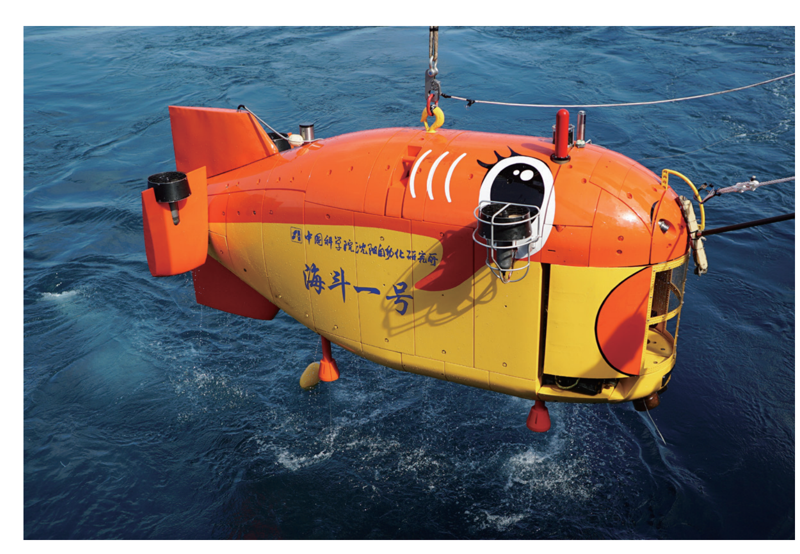


图 7　“海斗一号”自主遥控水下机器人

Figure 7　“Haidou 1” autonomous & remotely operated vehicle

2021 年 10 月，“海斗一号”再次开展马里亚纳海沟万米科考应用，总计完成 8 次万米深潜与作业，最大

深度 10 908 m，海底累计工作超 30 h、航程超 30 km、探测覆盖面积超 15 km^2，海底有效高清视频时长超 15 h，获取了 8 个点位或区域的典型万米深渊水文、生物、地质等数据或样品。在国际上首次实现了对“挑战者深渊”西部凹陷区的大范围全覆盖声学巡航探测。“海斗一号”的成功应用，表明了我国全海深无人潜水器正式跨入万米科考应用的新阶段，填补了当前国际上全海深无人潜水器万米科考应用的空白。

2.3 持续探索我国水下机器人在极地的科考应用

南、北极对全球系统影响非常关键，其变化将直接影响到全球的气候和海洋环境的变化。我国坚持南、北极科学考察是实现我国海洋防灾减灾、揭示全球气候变化、动态海洋过程形成和演变机理的重要活动。水下机器人作为一种先进的运动平台，搭载有关的观测设备，可为极地海洋环境研究提供一种大范围、连续的观测手段，推动南、北极科学研究的不断发展[8]。沈阳自动化研究所从 2003 年参加我国第二次北极科学考察以来，一直致力于推动水下机器人在极地科考中的探索应用，相继突破极地密集海冰覆盖安全回收、高纬度冰下导航等关键技术，研制和优化改造了一系列高技术水下机器人科考装备，实现了从冰底精细观测、海洋环境大范围观测到近海底高精度探测的技术跨越。

2.3.1 实现海冰底局部观测到海底大范围探测的技术跨越

在国家“863”计划支持下，沈阳自动化研究所先后研制了两型北极自主/遥控水下机器人（图 8），搭载海冰测厚声呐、光通量探测仪、视频观测等设备，分别于 2008 年、2010 年和 2014 年参加了我国北极科学考察，获取了北极海冰底部物理特征和海洋环境等重要参数，实现了海冰厚度的区域高精度测量。

2021 年，在中国第 12 次北极科考中，升级改造后的“探索 4500”在北纬 85° 海域成功完成下潜探测（图 9），这是我国首次使用自主水下机器人完成北极高纬度海冰区近海底科考任务。“探索 4500”在 4 000 m 海底连续工作，成功获取了近底高分辨多波束、水文及磁力数据。其连续成功下潜为我国不断深化对北极洋中脊多圈层物质能量交换及地质过程的探索和认知提供了重要数据资料。

2.3.2 实现我国水下机器人南极科考中首次示范应用

面向南大洋海洋环境调查任务，沈阳自动化研究所对“探索 1000”AUV 进行了适应性改造，搭载温盐



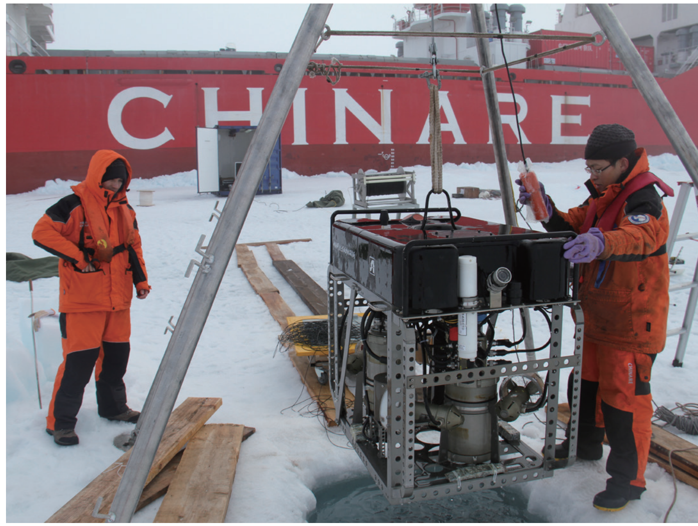


图 8　两型北极自主/遥控水下机器人

Figure 8　Two types of Arctic autonomous & remotely operated vehicle

深、溶解氧、浊度计、叶绿素等传感器，以提高南极浮冰覆盖的海洋环境适应性，于2019年和2020年先后两次参加中国南极科考，为考察队执行罗斯海多环境要素综合调查提供了重要技术支撑。

在第35次南极科考中，“探索1000”以南极极区海洋观测应用为目的，获得南极南纬75°海域海洋要素数据，验证了南极环境下自主导航、稳定航行、自主安全潜浮等功能和性能。在第36次南极科考中，“探索1000”（图10）水下连续工作35 h，航程近70 km，完成了近20个垂直剖面的连续观测，获得了海流、温度、盐度、浊度、溶解氧及叶绿素等大量水文探测数据，验证了我国自主水下机器人在极端海洋环境下开展科学探测的实用性和可靠性，为我国水下机器人南极科学考察业务化运行奠定技术基础。

近年来，在国家有关部门的大力支持下，我国水下机器人技术研发与科考应用能力有了长足的进步，多项技术装备填补了国内空白，部分技术达到国际先进水平。面向深海资源勘查、海洋科学研究等国家重大需求，构建了谱系化技术装备体系，引领了我国水下机器人装备发展，实现了深海资源近底高精度声光综合探测、深海原位取样及分析探测、超长航程跨季度跨海域持续观测及深渊海沟、南极和北极冰下探测，使我国具备了全海深探测与作业能力[9]。在推动材料、流体和声学等基础学科发展的基础上，不断推动设立机器人海洋学、机器人测绘学等新型学科，带动传感器、能源、推进、导航、通信等技术的进步，推动了我国深海科学研究与技术装备研发的紧密结合。

水下机器人应用的成功经验表明，坚持走深海技术国产化道路是我国的正确选择。我国具有全面自主掌握深海核心关键技术的能力和潜力。坚持“战略先导先行—重大研发任务攻关—示范应用”的路线，加强原创性、前瞻性、引领性科技攻关，把装备制造牢牢抓在自己手里，从而为海洋强国建设发挥更大作用。



图9 “探索4500”在“雪龙2”号极地科学考察船上布放入水
Figure 9 “Tansuo 4500” launched from “Xue Long 2” ship

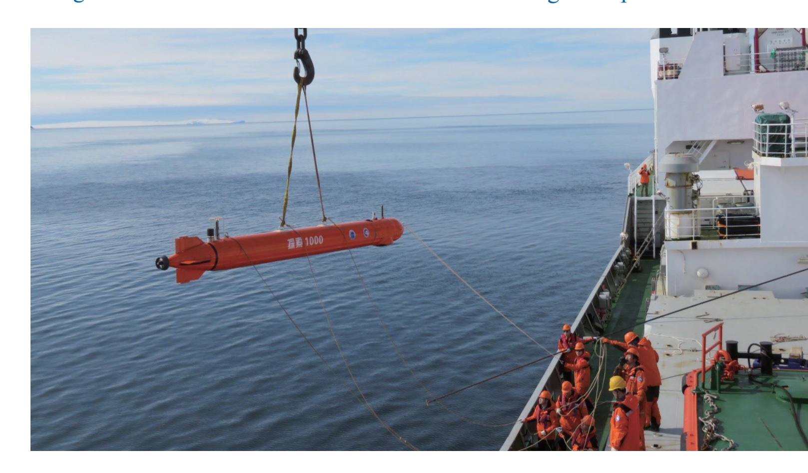


图10 “探索1000”在南极罗斯海布放
Figure 10 “Tansuo 1000” launched in the Ross Sea, Antarctica

3 水下机器人应用展望与建议

面向未来更复杂、更极端的应用场景，需要提高单体水下机器人的智能化水平。通过开展新型能源材料、流体力学、控制导航等传统学科与新兴学科的跨学科交叉融合与技术创新，推动人工智能、大数据等信息技术与水下机器人技术的深度融合。人工智能方法已经在机器人视觉、移动机器人和工业机器人控制等方面展现出优越的环境适应性；随着社会信息化不断提高，大数据技术应运而生，且获得了广泛的应用。这些先进技术为水下机器人智能化提供了新思路和新方法，例如：采用人工智能方法，可提高水下机

器人的环境感知理解、自主行为决策等智能化水平；采用大数据技术，可提升水下机器人健康自评估和修复、目标动态识别等能力。研发新一代智能水下机器人，进一步完善水下机器人谱系化装备体系，实现水下机器人向智能水下机器人的技术跨越，已成为水下机器人未来的发展趋势。

面向未来更广泛、更迫切的国家需求，需要充分利用不同类型水下机器人的技术特点，提高水下机器人集群综合探测能力。突破跨域集群多源实时感知、多源信息融合、即时决策响应等关键技术，实现机器人间的互联互通，构建多机器人跨域集群协同探测与作业系统，为实现海洋应用提供前瞻技术储备。

面向我国深海技术装备的未来应用，从研发极端环境装备、长期驻留科考、无人化科考、科学问题认知等方面，提出 4 点发展建议。

（1）研发适应极端海洋环境的深远海科考装备。面向南极、北极、深渊海沟等“三极”极端海洋环境应用的需求，提高自主环境感知、复杂环境适应、智能决策与自主生存等技术。研发超长航时海洋中小尺度观测系统、穿越北极自主水下机器人、环南大洋跨年连续观测水下机器人、南极冰腔探测作业机器人等。通过水下机器人的技术进步，提高人类对海洋的认知水平，深刻理解海洋对全球气候变化的影响。

（2）实现从航次型科考模式向深海长期驻留型科考模式的转变。针对深渊科考、深海矿产资源开采和深海油气资源开发等需求，突破海洋装备驻留海底所需解决的长期防腐蚀、高速信息交互、高效能源补给、模块化换装、区域全场景监控及自主作业等关键技术。构建海底基站原位观测与智能水下机器人大范围观测探测相结合的近海底科考体系，实现我国深海海底开展长期驻留连续科考与作业，深刻理解全球气候变化对海洋海底环境的影响。

（3）实现从有人科考向无人化科考模式的转变。面向更极端海洋观测与探测的需求，全面提升海洋科考效率，构建高海况适应的少人化或无人智能船与水下机器人深入融合的综合科考体系。突破高海况适应科考母船建造、水下机器人高效布放回收、远程虚拟的水下科考作业操作、自动化实验室样品处理与分析等技术。通过技术进步，降低海上科考队规模，提升海上无人装备应用水平，减少恶劣海况对科考作业的影响。

（4）不断提高海洋重大基础性科学问题认识水平。依托智能船和海洋机器人观测探测技术，不断深化对台风、内波、生态环境等海洋重大科学问题的认识。深化台风极端海洋动态过程认识，构建台风过程大气-海气界面-上层水体“跨界面”立体观测系统；突破台风核心区跟随观测瓶颈，揭示台风-海气耦合机制，提高预报精度，助力台风灾害预防。深化海洋中小尺度过程极端海洋动态过程认识，构建中小尺度过程“跨尺度”长时间立体同步观测系统；突破全周期立体协同动态跟踪观测瓶颈，揭示内波生消机制，实现准确预报，提升安全保障能力。深化海洋生态环境极端动态过程认识，构建海洋生态环境“跨学科”四维立体长时续观测系统；突破全方位高效动态协同观测瓶颈，揭示生态环境耦合机理，助力实现“双碳”目标。

经过多年的技术攻关和示范应用，中国构建了谱系化的水下机器人的装备体系，具备了开展不同类型水下机器人的正向设计能力。站在新的历史发展阶段，推动产业化进程，加快构建水下机器人工业化体系，加强行业应用，努力提升水下机器人对我国海洋经济的贡献度，为我国加快海洋强国建设作出更重要的科技贡献。

参考文献

1 封锡盛, 李一平, 徐会希, 等. 深海自主水下机器人发展及其在资源调查中的应用. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2746-2756.

Feng X S, Li Y P, Xu H X, et al. Development of deep-sea autonomous underwater vehicle and its applications in resource survey. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2746-2756. (in Chinese)

2 李硕, 刘健, 徐会希, 等. 我国深海自主水下机器人的研究现状. 中国科学：信息科学, 2018, 48(9): 1152-1164.
Li S, Liu J, Xu H X, et al. Research status of autonomous underwater vehicles in China. Scientia Sinica (Informationis), 2018, 48(9): 1152-1164. (in Chinese)

3 俞建成, 刘世杰, 金文明, 等. 深海滑翔机技术与应用现状. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2016, 8(2): 208-216.
Yu J C, Liu S J, Jin W M, et al. The present state of deep-sea underwater glider technologies and applications. Journal of Engineering Studies, 2016, 8(2): 208-216. (in Chinese)

4 连琏, 魏照宇, 陶军, 等. 无人遥控潜水器发展现状与展望. 海洋工程装备与技术, 2018, 5(4): 223-231.
Lian L, Wei Z Y, Tao J, et al. Development status and prospects of remotely operated vehicles. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2018, 5(4): 223-231. (in Chinese)

5 李一平. 自主/遥控水下机器人研究与应用. 现代物理知识, 2021, 33(1): 19-23.
Li Y P. Research and application of autonomous/remote controlled underwater vehicle. Modern Physics, 2021, 33(1): 19-23. (in Chinese)

6 沈新蕊, 王延辉, 杨绍琼, 等. 水下滑翔机技术发展现状与展望. 水下无人系统学报, 2018, 26(2): 89-106.
Shen X R, Wang Y H, Yang S Q, et al. Development of underwater gliders: An overview and prospect. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2018, 26(2): 89-106. (in Chinese)

7 刘峰, 刘予, 宋成兵, 等. 中国深海大洋事业跨越发展的三十年. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2613-2623.
Liu F, Liu Y, Song C B, et al. Three decades' development of China in deep-sea field. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2613-2623. (in Chinese)

8 Zeng J B, Li S, Liu Y. Application of unmanned underwater vehicles in polar research. Advances in Polar Science, 2021, 32(3): 173-184.

9 吴园涛, 段晓男, 沈刚, 等. 强化我国海洋领域国家战略科技力量的思考与建议. 地球科学进展, 2021, 36(4): 413-420.
Wu Y T, Duan X N, Shen G, et al. Thoughts and suggestions on strengthening the national strategic scientific and technological forces in the marine field of China. Advances in Earth Science, 2021, 36(4): 413-420. (in Chinese)

Application and Prospect of Unmanned Underwater Vehicle

LI Shuo[1,2] WU Yuantao[3] LI Chen[3] ZHAO Hongyu[1*] LI Yiping[1,2]

(1 State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3 Bureau of Major R&D Programs, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China)

Abstract Unmanned underwater vehicle (UUV) is one of the advanced technologies for human to explore and understand the ocean. It is an important equipment for China's construction of a marine power. This study introduces the current development status of UUV, with special focus on the latest application achievements of China's pedigree UUV developed by Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, in deep-sea mineral resource exploration, deep-sea scientific research, abyss research and North-South polar expedition. Combined with the current research basis of UUV, the development and application of underwater vehicle in the future are prospected. Through the research and development of far-reaching marine scientific research equipment adapted to extreme marine environment, the technological leap from voyage type scientific research mode to deep-sea long-term resident scientific research mode is realized, and the revolutionary transformation from manned scientific research mode to unmanned scientific research mode is also realized.

*Corresponding author

Keywords unmanned underwater vehicle (UUV), deep-sea resource investigation, deep-sea scientific research, abyss research, polar applications



李 硕 中国科学院沈阳自动化研究所研究员，副所长，机器人学国家重点实验室副主任。主要研究领域：水下机器人技术与应用、模式识别与智能系统等研究工作。主持科学技术部、中国科学院等多项重大课题。E-mail: shuoli@sia.cn

LI Shuo Professor of Shenyang Institute of Automation (SIA), Chinese Academy of Sciences (CAS). Deputy Director of SIA, Deputy Director of State Key Laboratory of Robotics. His research focuses on technology and application of unmanned underwater vehicle, pattern recognition and intelligent system, etc. In recent years, he has mainly undertaken more than 10 major projects sponsored by the Ministry of Science and Technology, CAS, and so on. E-mail: shuoli@sia.cn



赵宏宇 中国科学院沈阳自动化研究所研究员。主要研究领域：水下机器人技术与应用。E-mail:zhy@sia.cn

ZHAO Hongyu Professor of Shenyang Institute of Automation (SIA), Chinese Academy of Sciences (CAS). His research focuses on technology and application of unmanned underwater vehicle. E-mail: zhy@sia.cn

■责任编辑：张帆